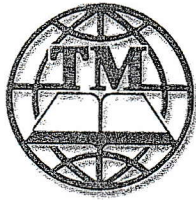


ЭМЧ



РОССИЯ

ISSN 0491-6441

**СВАРКА —
СВЯЗЕЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
НА СВАРИВАЕМЫЕ**

Сварочное Производство

2021 № 5



УЧРЕДИТЕЛЬ:

Издательский центр "Технология машиностроения"

Издается с января 1930 года

Журнал издается при содействии Министерства науки и высшего образования РФ,
Министерства промышленности и торговли РФ,
Российской инженерной академии,
Союза машиностроителей России,
Российского научно-технического сварочного общества

Редакционная коллегия:

Гл. редактор В. А. Казаков

Ю. В. Будкин	В. В. Пешков
В. К. Драгунов	А. И. Рымкевич
А. В. Казаков	Ю. Н. Сараев
Е. А. Калашников	О. Н. Севрюков
О. Е. Капустин	З. А. Сидлин
В. И. Кулик	В. А. Фролов
А. В. Люшинский	Г. Л. Хачатрян
В. П. Лялякин	О. А. Цукуров
Г. А. Меньшиков	И. Н. Шиганов
И. Н. Пашков	М. М. Штрикман

Ответственный редактор: Т. В. Аулова
Электронная верстка: ИП В. В. Яланский
Дизайн обложки: Е. С. Благовидов
Редактор-переводчик: Г. С. Потапова

Адрес редакции:

127015, Москва,
ул. Большая Новодмитровская, 23.

Для корреспонденции:

127015, Москва, а/я 65,
Издательский центр
"Технология машиностроения".
Телефоны:

гл. редактор — (495) 796 2491;
редакция — (495) 640 7903.

E-mail: svarka@ic-tm.ru
Http://www.ic-tm.ru

Журнал "Сварочное производство" переводится
на английский язык издательством
"Taylor & Francis" (Великобритания).

Перепечатка материалов из журнала "Сварочное
производство" категорически запрещена
без оформления договора в соответствии
с действующим законодательством РФ.

При перепечатке материалов ссылка на журнал
"Сварочное производство" обязательна.
Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по
делам печати, телерадиовещания и средств массо-
вых коммуникаций. Свидетельство о регистрации
ПИ № 77-7778.

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ
изданий для публикации трудов соискателей ученых
степеней (сайт: vak.ed.gov.ru/87).

Журнал входит в систему цитирования РФ РИНЦ,
международные реферативные базы данных научных
изданий "Scopus", "Chemical Abstracts" (p.t.).

Цена свободная.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Павлов В. В., Козырев Н. А., Усольцев А. А., Михно А. Р., Крюков Р. Е. — Изучение влияния энерго-технологических режимов сварки под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца, на физико-механические свойства сварного шва _____ 3
- Цумарев Ю. А., Сеница А. Н., Рогачевский Н. И., Шелег В. К., Цумарев Е. Н. — Распределение напряжений в стыковых сварных соединениях деталей разной толщины _____ 8
- Муравьев В. И., Бахматов П. В., Григорьев В. В., Гаврилов М. С. — Особенности распределения водорода в сварном шве титановых сплавов, выполненном электронно-лучевой сваркой _____ 13
- Сейдгазов Р. Д., Мирзаде Ф. Х. — Пороговые условия термокапиллярного формирования глубокой каверны в аддитивном процессе селективного лазерного плавления металлического порошкового слоя _____ 20

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Голубенко Ю. В., Богданов А. В., Таксанц М. В. — Коллоидные системы наночастиц золота и серебра, полученные методом ИПА твердых мишеней в жидкости _____ 31
- Григорьянц А. Г., Костарев В. А., Шустова Л. А., Колчанов Д. С., Трушников А. Н., Дренин А. А., Шишов А. Ю., Фунтиков В. А. — Особенности выращивания изделий из конструкционной стали 28Х3СНМВФА методом коаксиального лазерного плавления _____ 35
- Малов И. Е. — Аддитивные технологии в производстве пресс-форм _____ 44
- Емельянов М. В., Фоканов А. Н., Подуражная В. Ф., Тебякин А. В. — Исследование паяных вакуумно-плотных соединений бериллия с конструкционными металлами _____ 48

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Сергеев С. В., Луценко А. В., Веретенников С. А. — Использование сетевых матричных структур для конструкторско-технологической подготовки производства _____ 56

УДК 812.35.15.13.19
DOI: 10.34641/SP.2021.1038.5.020

В. В. ПАВЛОВ, инж.

ООО "Регионстрой", г. Новокузнецк

Н. А. КОЗЫРЕВ, д-р техн. наук, А. А. УСОЛЬЦЕВ, канд. техн. наук, А. Р. МИХНО, аспирант
ФГБОУ ВО "Сибирский государственный индустриальный университет", г. Новокузнецк

Р. Е. КРЮКОВ, канд. техн. наук

АО "Новокузнецкий завод резервуарных металлоконструкций им. Н. Е. Крюкова"

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Изучение влияния энерго-технологических режимов сварки под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца, на физико-механические свойства сварного шва

Определено влияние энерго-технологических режимов сварки на физико-механические свойства сварных швов, полученных при сварке под флюсом, изготовленным на основе шлака производства силикомарганца. Исследованы различные режимы сварки, обеспечивающие необходимую глубину провара и отсутствие внешних дефектов. Показано, что изменение параметров силы тока, скорости сварки и напряжения влияют на физико-механические свойства сварного шва и концентрацию водорода в сварном шве.

The influence of the welding energy-technological modes on the physical and mechanical properties of weld seams obtained by submerged arc welding, made on the basis of silicomanganese slag, is determined. Various welding modes allows the required penetration depth and the absence of external defects is investigated. It is shown that changes in the current strength value, welding speed and voltage exert influence upon the physical and mechanical properties of the weld seam and the hydrogen concentration in the weld seam.

Ключевые слова: сварка, флюс, шлак силикомарганца, химсостав, физико-механические свойства

Key words: welding, flux, silicomanganese slag, chemical composition, physical and mechanical properties

В настоящее время широкое распространение в РФ получили сварочные флюсы, изготовленные на основе оксидов марганца типа АН-348А, АН-67, АН-39С [1—3]. В условиях СибГИУ проведен ряд работ по использованию в качестве аналогов таких сварочных флюсов шлака производства силикомарганца [4—10]. При этом существенное влияние на качественные показатели сварного шва оказывают режимы сварки. Целью данной работы является исследование влияния энерго-технологических

режимов сварки под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца, на физико-механические свойства сварного шва, полученного при автоматической сварке проволокой Св-08ГА низколегированной стали 09Г2С.

Методика проведения экспериментов

Для проведения исследований сварочно-технологических свойств, был изготовлен сварочный флюс на основе шлака производства

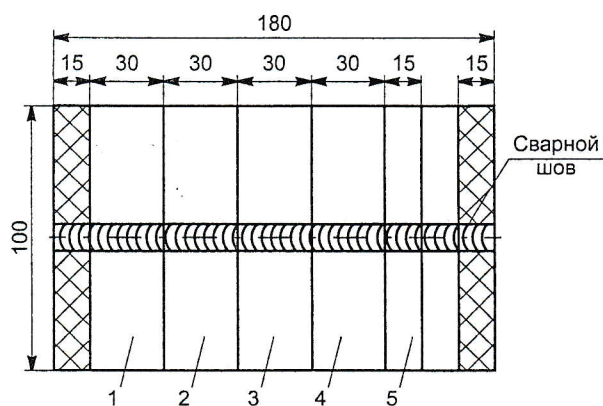


Рис. 1. Схема вырезки образцов для испытаний: 1 — макрошлифы; 2 — микрошлифы; 3 — твердость; 4 — износостойкость; 5 — определение содержания водорода

силикомарганца с химическим составом, мас. %: 0,42 FeO, 16,22 MnO, 29,00 CaO, 41,34 SiO₂, 6,53 Al₂O₃, 1,33 MgO, 0,24 S, 0,022 P, 0,008 ZnO, 0,031 C, 0,31 F, 0,15 TiO₂, 0,025 Cr₂O₃. Проведенные ранее исследования [11] показали, что для данных флюсов наиболее приемлемым является использование фракции 0,45—2,5 мм. При исследовании использовано оборудование НПЦ "Сварочные процессы и технологии" и центра коллективного пользования "Материаловедение" СибГИУ.

Сварка образцов из стали 09Г2С толщиной 20 мм, производилась встык без разделки кромок, сварочной проволокой Св-08ГА с помощью сварочного трактора АСАВ-1250 с использованием изготовленного флюса. Для сравнения была проведена сварка пластин под флюсом АН-348. Схема вырезки образцов из сваренных пластин представлена на рис. 1.

Используемый флюс сушился в термической электропечи, в течение 2-х часов при температуре 300 °С. Металлические пластины перед процессом наплавки очищались угловой шлифовальной машинкой. Удалялись с поверхности металлов средства консервации, загрязнения, ржавчина и оксидные пленки. После сварки визуальным методом изучалась поверхность металла шва и шлаковая корка с прилегающей ко шву стороны и определялся химический состав. Химический состав шлаковых корок, флюсов определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800. Определение химического состава

сварных швов определяли атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. На ряде образцов определение химического состава металла сварных швов проводили химическими методами: на содержание углерода по ГОСТ 12344—2003, серы по ГОСТ 12345—2001 и фосфора по ГОСТ 12347—77.

Образцы для проведения исследований макро- и микроструктуры, твердости, износостойкости были подготовлены по методике, включающей вырезку образцов на отрезном станке KKS 315L, шлифование на плоскошлифовальном станке ЗД725, полирование на полировальном станке FROMMIA 835 SE.

Металлографические исследования полированных микрошлифов проводились с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от × 100 до × 1000. Микроструктуру выявляли путем травления образцов в растворе 4 % HNO₃ в этиловом спирте. Величину зерна определяли в соответствии с ГОСТ 5639—82 при увеличении × 100. Исследование образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений проводили по ГОСТ 1778—70. Полированную поверхность изучали при увеличении × 100 с помощью металлографического микроскопа ЛабоМет-1И. Из вырезанных образцов изготавливались макрошлифы размером 20 × 55 × 14 мм. Измерение твердости исследуемых образцов выполняли по методу Бринелля с помощью ультразвукового твердомера УЗИТ-3 в соответствии с требованиями ГОСТ 9012—59.

Таблица 1

№ эксперимента	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, см/мин	Погонная энергия, Дж/см
0	700	28	30	42 000
1	600	28	28	36 000
2	600	30	32	33 750
3	600	32	30	38 400
4	650	28	32	34 125
5	650	30	30	39 000
6	650	32	28	44 571
7	700	28	30	39 200
8	700	30	28	45 000
9	700	32	32	42 000

Таблица 2

№ образца	Массовая доля элементов, мас. %											Н, см ³ /100 г
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	Mo	Al	S	P	
0	0,11	0,41	1,16	0,05	0,31	0,15	0,002	0,10	0,009	0,014	0,014	1,1
1	0,07	0,48	1,24	0,05	0,43	0,16	0,001	0,14	0,012	0,013	0,016	1,2
2	0,08	0,54	1,38	0,06	0,28	0,17	0,003	0,08	0,018	0,014	0,014	1,1
3	0,08	0,51	1,31	0,06	0,32	0,15	0,001	0,10	0,014	0,014	0,013	1,4
4	0,08	0,49	1,20	0,05	0,45	0,17	0,002	0,16	0,013	0,011	0,015	1,1
5	0,07	0,50	1,26	0,05	0,43	0,17	0,003	0,14	0,002	0,012	0,018	1,1
6	0,07	0,49	1,25	0,05	0,40	0,16	0,002	0,13	отс.	0,012	0,015	1,0
7	0,09	0,50	1,23	0,04	0,41	0,13	0,001	0,14	0,014	0,011	0,011	1,3
8	0,09	0,50	1,31	0,06	0,31	0,17	0,001	0,09	0,019	0,014	0,013	1,0
9	0,07	0,53	1,27	0,05	0,37	0,15	0,002	0,12	0,010	0,015	0,016	0,9

Исследованы различные режимы сварки, обеспечивающие необходимую глубину провара и отсутствие внешних дефектов (пор, трещин, раковин). Режимы сварки образцов выбирались методом планирования эксперимента $3^{(3-1)}$ за основу взят режим 0: сила тока $I = 700$ А, напряжение $U = 28$ В, скорость сварки $v = 30$ см/мин. Исследуемые режимы сварки образцов представлены в табл. 1.

По полученным данным были построены зависимости влияния параметров режима сварки на механические свойства сварных образцов. Механические свойства predeterminedены при прочих равных условиях содержанием серы и фосфора во флюсах (рис. 2 и 3), и, тем не менее, изменение параметров силы тока, скорости сварки и напряжения также могут влиять на физико-механические свойства сварного шва (рис. 4 и 5).

Химический состав исследуемых сварных образцов и параметры концентрации водорода приведены в табл. 2. Механические свойства исследуемых образцов представлены в табл. 3. Показано, что механические свойства образцов определяются не только химическим составом, но и режимами сварки. Так ударная вязкость при отрицательных и положительных температурах повышается при увеличении силы тока (рис. 2), а показатели временного сопротивления и предела текучести снижаются при увеличении напряжения.

Твердость по Бринеллю (НВ) исследуемых сварных образцов измерялась по схеме, представленной на рис. 3. Результаты замеров приведены в табл. 4.

Как видно из рис. 5—7 значения твердости так же зависят от режимов сварки.

Зависимости содержания водорода в сварном шве связаны с режимами сварки. Повыше-

Таблица 3

№ эксперимента	Временное сопротивление разрыву, σ_B , Н/мм ²	Предел текучести условный, σ_T , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	KCV +20 °С	KCV -20 °С
0	576	482	21	<u>68*</u> 63—75**	<u>22,3*</u> 20—26**
1	563	470	21	<u>59,6</u> 49—81	<u>20,3</u> 15—31
2	582	481	22	<u>64,3</u> 60—69	<u>20,6</u> 17—25
3	560	430	21	<u>66,3</u> 52—77	<u>32</u> 27—35
4	570	459	21	<u>59,33</u> 56—62	<u>30</u> 27—32
5	570	466	22	<u>67,3</u> 59—73	<u>32</u> 31—33
6	563	462	21	<u>59,3</u> 53—65	<u>29,6</u> 27—34
7	572	456	21	<u>70,6</u> 63—85	<u>30,6</u> 27—33
8	570	464	21	<u>58,3</u> 53—67	<u>29,3</u> 23—33
9	553	440	22	<u>62</u> 55—68	<u>23,3</u> 18—27
Флюс АН-348А (Образец сравнения)	543	368	25	<u>55</u> 52—58	<u>18</u> 16—21

* — средние значения; ** — минимальные и максимальные значения.

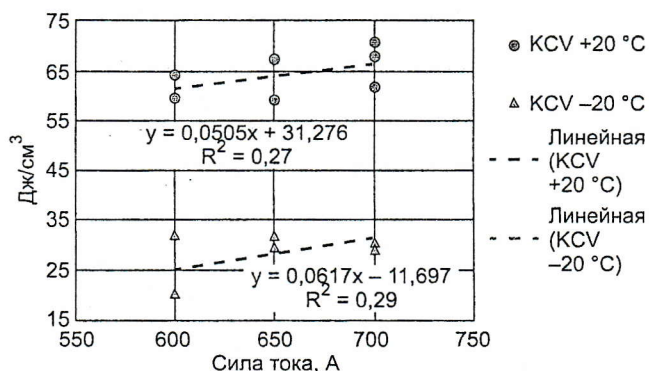


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости KCV от силы тока при сварке

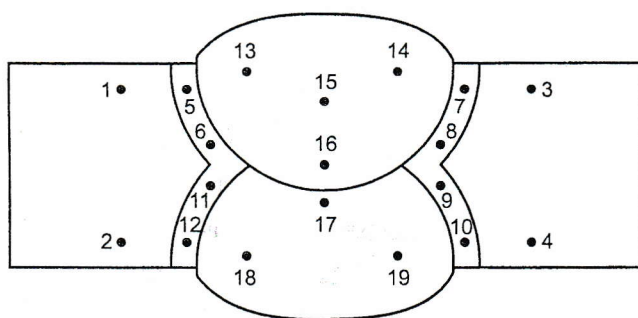


Рис. 3. Схема замера твердости сварных образцов

ние параметров силы тока, напряжения и скорости сварки при прочих равных условиях снижает концентрацию водорода в сварном шве.

Применение математико-статистических методов [12—14] позволило построить математическую модель влияния технологических режимов (сила тока, напряжение при сварке, скорость сварки) на содержание водорода в сварном шве.

Полученные зависимости проверялись по показателю средней ошибки аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100, \%$$

где m — количество наблюдений; \tilde{Y}_i — вычисленное значение результирующего показателя; Y_i — фактическое значение результирующего показателя.

Регрессионный анализ влияния режимов сварки образцов, при параметрах: I — сила тока, А; U — напряжение, В; V — скорость сварки, см/мин; E — погонная энергия, Дж/см представлен следующими уравнениями:

Без учета погонной энергии:
 $H_2, (\text{см}^3/100 \text{ г}) = 3,26 + 0,02274 \cdot I + 0,504 \cdot V - 0,000406 \cdot E$ (ошибка аппроксимации составляет 3,08 %).

С учетом погонной энергии:
 $H_2, (\text{см}^3/100 \text{ г}) = -20,0253 + 0,0526 \cdot I + 1,1505 \cdot U - 0,001193 \cdot I \cdot U - 0,4094 \cdot V - 0,000307 \cdot E$ (ошибка аппроксимации составляет 0,63 %).

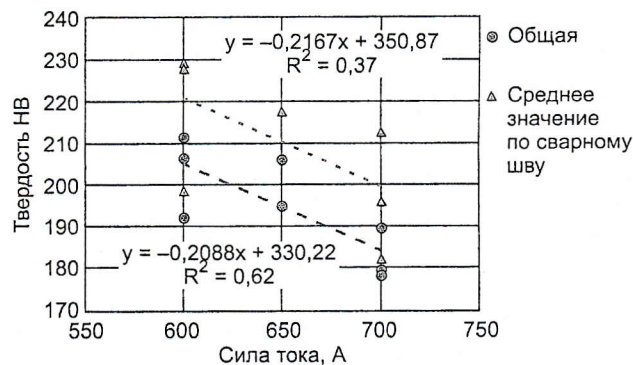


Рис. 4. Зависимость твердости НВ от изменения силы тока

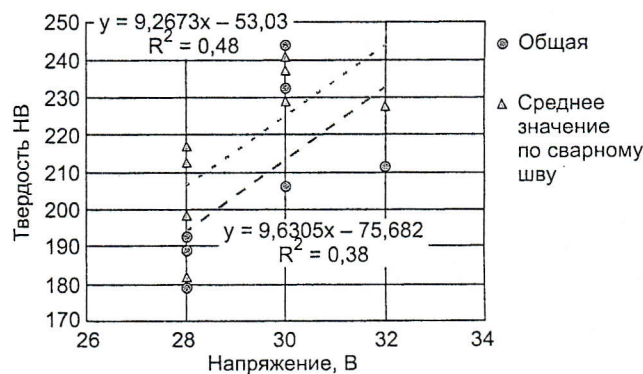


Рис. 5. Зависимость твердости НВ от изменения напряжения

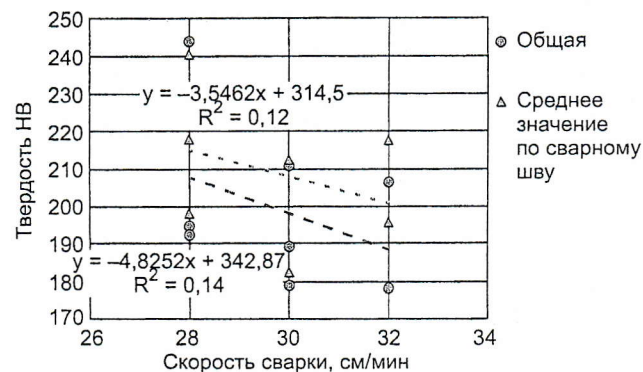


Рис. 6. Зависимость твердости НВ от скорости сварки

Таблица 4

№ эксперимента	Основной металл, точки												Сварной шов, точки						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	176	160	181	168	178	194	169	186	184	179	185	174	191	186	186	192	174	168	178
1	196	200	172	193	194	186	191	205	204	169	161	191	188	147	193	215	230	220	196
2	162	189	179	185	172	206	197	206	214	210	202	188	199	220	246	237	229	237	235
3	192	235	180	196	234	181	208	189	187	172	235	211	270	247	230	238	209	187	214
4	221	164	170	176	207	223	193	188	205	201	203	229	227	185	212	245	205	228	218
5	215	198	203	182	234	220	253	257	255	262	221	258	204	224	227	276	213	249	265
6	158	172	179	175	173	203	189	185	155	205	195	187	218	264	247	210	194	178	212
7	158	150	187	202	164	175	177	166	188	188	167	185	195	219	225	201	205	213	229
8	180	208	230	186	221	224	318	317	318	298	167	280	240	305	284	187	178	280	209
9	142	176	164	133	147	161	177	163	175	207	190	181	166	218	211	203	212	159	201

Таким образом, изменение параметров силы тока, скорости сварки и напряжения могут влиять на физико-механические свойства сварного шва и концентрацию водорода в сварном шве.

ВЫВОДЫ

1. В результате исследований определено, что концентрация водорода в сварном шве связана с режимами сварки. Повышение параметров силы тока, напряжения и скорости сварки при прочих равных условиях снижает концентрацию водорода в сварном шве.

2. Построены математические модели влияния энерго-технологических режимов сварки (сила тока, напряжение, скорость сварки) на содержание водорода в сварном шве.

3. Полученные практические данные по физико-механическим свойствам легли в основу разработки режимов сварки под флюсом с использованием в качестве сварочного флюса шлака производства силикомарганца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапов Н. Н., Конищев Б. П., Курланов С. А. Сварочные материалы для дуговой сварки: справочник. В 2-х т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы: справочное пособие / М.: Машиностроение, 1989. 544 с.
2. Подгаецкий В. В., Рабкин Д. М. Флюсы для автоматической и полуавтоматической сварки / Киев: Изд. АН УССР, 1954. 56 с.
3. Конищев Б. П., Курланов С. А., Потапов Н. Н. Сварочные материалы для дуговой сварки: справочное пособие. В 2-х т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / М.: Машиностроение, 1989. 104 с.

4. Козырев Н. А., Крюков Р. Е., Козырева О. Е., Липатова У. И. Изготовление сварочных флюсов с использованием отвальных шлаков производства силикомарганца / Обработка материалов: современные проблемы и пути решения: сборник трудов всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / Томск: Юргинский технологический институт, изд. Томского политехнического университета. 2015. С. 90—95.

5. Kozыrev N. A., Kryukov R. E., Kozыreva O. E., Lipatova U. I., Filonov A. V. Production of Welding Fluxes Using Waste Slag Formed in Silicomanganese Smelting // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. Vol. 125. No 1—6: All-Russia Scientific and Practical Conference on Materials Treatment: Current Problems and Solutions 26—28 November 2015, Yurga, Russia | doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012034.

6. Kozыrev N. A., Kryukov R. E., Lipatova U. I., Kozыreva O. E. On the use of slag from silicomanganese production for welding flux manufacturing / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150 (2016) 012032 — pages 1—9 Doi: 10.1088/1757-899X/150/1/012032

7. Козырев Н. А., Крюков Р. Е. Эффективное использование шлака силикомарганца для изготовления сварочных флюсов. Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сборник трудов Международной научно-практической конференции 18—21 апреля 2017 года / Кемерово: КузГТУ, 2017. С. 134—139.

8. Козырев Н. А., Крюков Р. Е., Крюков Н. Е., Ковальский И. Н., Козырева О. Е. Разработка новых сварочных флюсов и флюс-добавок для сварки и наплавки стали с использованием отходов металлургического производства. Сообщение 2. Сварочные флюсы на основе шлака силикомарганца // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 5. С. 85—89.

9. Kryukov R. E., Kozыrev N. A., Prokhorenko O. D., Bashenko L. P., Kibko N. V. Quality of weld seams produced with flux based on silicomanganese slag // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 7. P. 440—444.

10. Kryukov R. E., Kozыrev N. A., Kozыreva O. A., Usoltsev A. A. Manufacturing of New Welding Fluxes Using Silicomanganese Slag. International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering / (FEC-2017) 18—21 April 2017, Kemerovo,

УДК 812.35.03.13

Ю. А. ЦУМАРЕВ, канд. техн. наук, А. Н. СИНИЦА, канд. техн. наук,
Н. И. РОГАЧЕВСКИЙ, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет, г. Могилев (Республика Беларусь)

В. К. ШЕЛЕГ, д-р техн. наук, Е. Н. ЦУМАРЕВ, инж.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Республика Беларусь)

E-mail: u_tsumarev@mail.ru

Распределение напряжений в стыковых сварных соединениях деталей разной толщины

Рассмотрены особенности работы стыковых сварных соединений заготовок неравной толщины, установлено, что в асимметричных соединениях при работе под нагрузкой имеют место дополнительные напряжения, обусловленные изгибом, которые необходимо учитывать при конструировании. Показано, что в стандартных симметричных сварных соединениях заготовок неравной толщины в области сужения более толстой детали имеет место значительная перегрузка, которую также следует учитывать при конструировании соединения. Предложены конструкции симметричных сварных соединений, не имеющих перегруженных зон.

The features of the operation of butt welded joints of the blanks with unequal thickness are considered and it is established that in asymmetric joints at operation under load there are additional stresses due to bending, which must be taken into account when designing. It is shown that in standard symmetric welded joints of the blanks with unequal thickness there is a significant overload in the area of narrowing of a thicker part, which should also be taken into account when designing the joint. Designs of symmetrical welded joints without overlaid zones are proposed.

Ключевые слова: стыковое сварное соединение, асимметричное стыковое сварное соединение, соединение, равнопрочность, напряжения изгиба, область сужения, перегрузка метод конечных элементов

Key words: butt-welded joint, asymmetric butt-welded joint, joint, equal strength, bending stress, narrowing area, overload, finite element method

Развитие техники в современных условиях тесно связано с совершенствованием сварочных технологий. При этом авторитетные специалисты отмечают, что наиболее высокие технико-экономические показатели могут быть достигнуты только при оптимальном конструировании сварных изделий и в первую очередь

сварных соединений [1]. В свою очередь, оптимальное конструирование требует тщательного анализа полей эксплуатационных напряжений, на базе которого могут быть разработаны новые, более совершенные конструкции сварных соединений с последующей оценкой их несущей способности. Для этого у исследова-